



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑯ Offenlegungsschrift  
⑯ DE 198 05 184 A 1

⑯ Int. Cl. 6:  
**G 01 K 7/34**  
F 02 M 51/06  
H 02 N 2/00

DE 198 05 184 A 1

⑯ Aktenzeichen: 198 05 184.0  
⑯ Anmeldetag: 10. 2. 98  
⑯ Offenlegungstag: 12. 8. 99

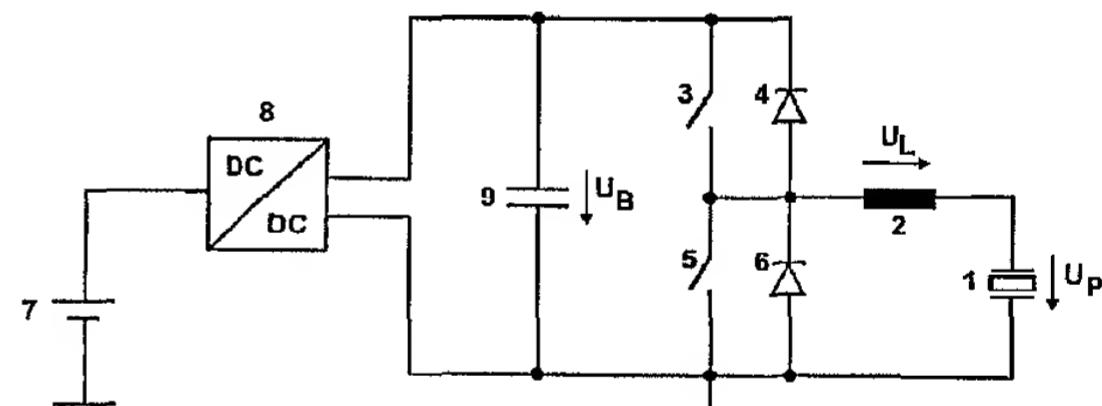
⑯ Anmelder:  
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

⑯ Erfinder:  
Reineke, Joerg, 70469 Stuttgart, DE; Hock, Alexander, 70435 Stuttgart, DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑯ Verfahren und Vorrichtung zum Ermitteln der Temperatur eines piezoelektrischen Elements

⑯ Es werden ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Ermitteln der Temperatur eines piezoelektrischen Elements beschrieben. Das Verfahren und die Vorrichtung zeichnen sich durch ein Ermitteln der Kapazität des piezoelektrischen Elements bei der gesuchten Temperatur und ein Bestimmen der gesuchten Temperatur des piezoelektrischen Elements, basierend auf der ermittelten Kapazität und der Temperaturabhängigkeit der Kapazität, aus. Dadurch kann die Temperatur eines piezoelektrischen Elements einfach und ohne Beeinflussung der Funktion desselben ermittelt werden.



DE 198 05 184 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 6, d. h. ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Ermitteln der Temperatur eines piezoelektrischen Elements.

Bei den vorliegend näher betrachteten piezoelektrischen Elementen handelt es sich insbesondere, aber nicht ausschließlich um als Aktoren bzw. Stellglieder verwendete piezoelektrische Elemente. Piezoelektrische Elemente lassen sich für derartige Zwecke einsetzen, weil sie bekanntermaßen die Eigenschaft aufweisen, sich in Abhängigkeit von einer daran angelegten Spannung zusammenzuziehen oder auszudehnen.

Die praktische Realisierung von Stellgliedern durch piezoelektrische Elemente erweist sich insbesondere dann von Vorteil, wenn das betreffende Stellglied schnelle und/oder häufige Bewegungen auszuführen hat.

Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Stellglied erweist sich unter anderem bei Kraftstoff-Einspritzdüsen für Brennkraftmaschinen als vorteilhaft. Zur Einsetzbarkeit von piezoelektrischen Elementen in Kraftstoff-Einspritzdüsen wird beispielsweise auf die EP 0 371 469 B1 und die EP 0 379 182 B1 verwiesen.

Piezoelektrische Elemente sind kapazitive Verbraucher, welche sich, wie vorstehend bereits angedeutet wurde, entsprechend dem jeweiligen Ladungszustand bzw. der sich daran einstellenden oder angelegten Spannung zusammenziehen und ausdehnen.

Das Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements kann unter anderem über ein induktive Eigenschaften aufweisendes Bauelement wie beispielsweise eine Spule erfolgen, wobei diese Spule in erster Linie dazu dient, den beim Laden auftretenden Ladestrom und den beim Entladen auftretenden Entladestrom zu begrenzen. Eine solche Anordnung ist in **Fig. 7** veranschaulicht.

Das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element ist in der **Fig. 7** mit dem Bezugszeichen **101** bezeichnet. Es ist Bestandteil eines über einen Ladeschalter **102** schließbaren Ladestromkreises und eines über einen Entladeschalter **106** schließbaren Entladestromkreises, wobei der Ladestromkreis aus einer Serienschaltung des Ladeschalters **102**, einer Diode **103**, einer Ladespule **104**, des piezoelektrischen Elements **101**, und einer Spannungsquelle **105** besteht, und wobei der Entladestromkreis aus einer Serienschaltung des Entladeschalters **106**, einer Diode **107**, einer Entladespule **108** und des piezoelektrischen Elements **101** besteht.

Die Diode **103** des Ladestromkreises verhindert, daß im Ladestromkreis ein das piezoelektrische Element entladender Strom fließen kann. Die Diode **103** und der Ladeschalter **102** sind gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Die Diode **107** des Entladestromkreises verhindert, daß im Entladestromkreis ein das piezoelektrische Element ladender Strom fließen kann. Die Diode **107** und der Ladeschalter **106** sind wie die Diode **103** und der Ladeschalter **102** gemeinsam als ein Halbleiterschalter realisierbar.

Wird der normalerweise geöffnete Ladeschalter **102** geschlossen, so fließt im Ladestromkreis ein Ladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element **101** geladen wird; die im piezoelektrischen Element **101** gespeicherte Ladung bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements **101** werden nach dem Laden desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Wird der normalerweise ebenfalls geöffnete Entladeschalter **106** geschlossen, so fließt im Entladestromkreis ein

Entladestrom, durch welchen das piezoelektrische Element **101** entladen wird; der Ladezustand des piezoelektrischen Elements **101** bzw. die sich an diesem dadurch einstellende Spannung und damit auch die aktuellen äußeren Abmessungen des piezoelektrischen Elements **101** werden nach dem Entladen desselben im wesentlichen unverändert beibehalten.

Durch die in der **Fig. 7** gezeigte Anordnung läßt sich das piezoelektrische Element **101** mit relativ geringem Aufwand laden und entladen.

Das Verhalten des piezoelektrischen Elements, insbesondere die durch das Laden und Entladen bewirkte Längenänderung (der Hub) desselben ist allerdings stark temperaturabhängig. Damit piezoelektrische Elemente als Stellglieder bzw. Aktoren in Kraftstoff-Einspritzdüsen eingesetzt werden können, müssen sie abhängig von deren Temperatur geladen und entladen werden. Zur Erfassung der Temperatur des piezoelektrischen Elements kann beispielsweise ein Temperatursensor verwendet werden, der auf das piezoelektrische Element aufgeklebt wird. Dies ist jedoch relativ aufwendig und kann das betreffende piezoelektrische Element auch in seiner Funktion beeinflussen.

Der vorliegenden Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, das Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 bzw. die Vorrichtung gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 6 derart weiterzubilden, daß sich die Temperatur von piezoelektrischen Elementen möglichst einfach und ohne Beeinflussung deren Funktion ermitteln läßt.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 1 (Verfahren) und durch die im kennzeichnenden Teil des Patentanspruchs 6 (Vorrichtung) beanspruchten Merkmale gelöst.

Demnach ist vorgesehen,

- 35 – die Kapazität des piezoelektrischen Elements bei der gesuchten Temperatur zu ermitteln, und die gesuchte Temperatur des piezoelektrischen Elements basierend auf der ermittelten Kapazität und der Temperaturabhängigkeit der Kapazität zu bestimmen (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 1) bzw.
- 40 – Mittel zum Ermitteln der Kapazität des piezoelektrischen Elements bei der gesuchten Temperatur und zum Bestimmen der gesuchten Temperatur des piezoelektrischen Elements basierend auf der ermittelten Kapazität und der Temperaturabhängigkeit der Kapazität vorzusehen (kennzeichnender Teil des Patentanspruchs 6).

Die Ermittlung der Temperatur des piezoelektrischen Elements auf dem Umweg über dessen Kapazität und deren Temperaturabhängigkeit erweist sich als relativ einfach, weil

- 50 1) die Abhängigkeit der Kapazität des piezoelektrischen Elements von dessen Temperatur nahezu linear ist, und
- 55 2) die Ermittlung der Kapazität des piezoelektrischen Elements mit relativ geringem Aufwand durchführbar ist (die Kapazität läßt sich beispielsweise aus bei einem Lade- oder Entladevorgang ermittelten oder verwendeten Werten des (Ent-)Ladestroms, der (Ent-)Ladezeit und der sich dabei am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung oder der sich dadurch ergebenden Längenänderung des piezoelektrischen Elements berechnen).

Auf das Vorsehen eines Temperatursensors kann verzichtet werden; die Temperatur kann auch ohne einen solchen Sensor, also einfach und gänzlich ohne Beeinflussung der

Funktion des piezoelektrischen Elements ermittelt werden.

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind den Unteransprüchen, der folgenden Beschreibung und den Figuren entnehmbar.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert. Es zeigen

**Fig. 1** eine Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements mit einstellbarem Lade- bzw. Entladestrom,

**Fig. 2** eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Ladephase (Ladeschalter 3 geschlossen) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

**Fig. 3** eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Ladephase (Ladeschalter 3 wieder geöffnet) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

**Fig. 4** eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer ersten Entladephase (Entladeschalter 5 geschlossen) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

**Fig. 5** eine Darstellung zur Erläuterung der sich während einer zweiten Entladephase (Entladeschalter 5 wieder geöffnet) in der Anordnung nach **Fig. 1** einstellenden Verhältnisse,

**Fig. 6** den zeitlichen Verlauf von sich beim Betrieb der Anordnung gemäß **Fig. 1** einstellenden Spannungs- und Stromverläufen, und

**Fig. 7** eine herkömmliche Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements.

Die piezoelektrischen Elemente, deren Laden und Entladen im folgenden näher beschrieben wird, sind beispielsweise als Stellglieder in Kraftstoff-Einspritzdüsen (insbesondere in sogenannten Common Rail Injektoren) von Brennkraftmaschinen einsetzbar. Auf einen derartigen Einsatz der piezoelektrischen Elemente besteht jedoch keinerlei Einschränkung; die piezoelektrischen Elemente können grundsätzlich in beliebigen Vorrichtungen für beliebige Zwecke eingesetzt werden.

Es wird davon ausgegangen, daß sich die piezoelektrischen Elemente im Ansprechen auf das Laden ausdehnen und im Ansprechen auf das Entladen zusammenziehen. Die Erfindung ist selbstverständlich jedoch auch dann anwendbar, wenn dies gerade umgekehrt ist.

Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung sind im betrachteten Beispiel insbesondere dazu ausgelegt, den das piezoelektrische Element ladenden Ladestrom und den das piezoelektrische Element entladenden Entladestrom unter Berücksichtigung der Temperatur des piezoelektrischen Elements einzustellen, wobei die Ermittlung der Temperatur des piezoelektrischen Elements durch Ermitteln der Kapazität des piezoelektrischen Elements bei der gesuchten Temperatur, und Bestimmen der gesuchten Temperatur des piezoelektrischen Elements basierend auf der ermittelten Kapazität und der Temperaturabhängigkeit der Kapazität erfolgt.

Eine Anordnung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements mit einstellbarem Lade- und Entladestrom ist in **Fig. 1** gezeigt und wird nachfolgend unter Bezugnahme darauf beschrieben.

Das piezoelektrische Element, das es im betrachteten Beispiel zu laden gilt, ist in der **Fig. 1** mit dem Bezugszeichen 1 bezeichnet.

Wie aus der **Fig. 1** ersichtlich ist, liegt der eine der Anschlüsse des piezoelektrischen Elements 1 dauerhaft auf Masse (ist mit einem ersten Pol einer Spannungsquelle verbunden), wohingegen der andere der Anschlüsse des piezoelektrischen Elements über eine (zugleich als Ladespule und Entladespule wirkende) Spule 2 und eine Parallelschaltung aus einem Ladeschalter 3 und einer Diode 4 mit dem zweiten Pol der Spannungsquelle und über die Spule 2 und eine Parallelschaltung aus einem Entladeschalter 5 und einer Diode 6 mit dem ersten Pol der Spannungsquelle verbunden ist.

Die Spannungsquelle besteht aus einer Batterie 7 (beispielsweise einer KFZ-Batterie), einem dieser nachgeschalteten Gleichspannungswandler 8, und einem diesem nachgeschalteten, als Pufferkondensator dienenden Kondensator 9. Durch diese Anordnung wird die Batteriespannung (beispielsweise 12 V) in eine im wesentlichen beliebige andere Gleichspannung umgesetzt und als Versorgungsspannung bereitgestellt.

Das Laden und das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 erfolgen im betrachteten Beispiel getaktet. D.h., der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 werden während des Lade- bzw. Entladevorganges wiederholt geschlossen und geöffnet.

Die sich dabei einstellenden Verhältnisse werden nachfolgend unter Bezugnahme auf die **Fig. 2** bis 5 erläutert, von denen die **Fig. 2** und 3 das Laden des piezoelektrischen Elements 1, und die **Fig. 4** und 5 das Entladen des piezoelektrischen Elements 1 veranschaulichen.

Der Ladeschalter 3 und der Entladeschalter 5 sind, wenn und solange kein Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements 1 erfolgt, geöffnet. In diesem Zustand befindet sich die in der **Fig. 1** gezeigte Schaltung im stationären Zustand. D.h., das piezoelektrische Element 1 behält seinen Ladungszustand im wesentlichen unverändert bei, und es fließen keine Ströme.

Mit dem Beginn des Ladens des piezoelektrischen Elements 1 wird der Ladeschalter 3 wiederholt geschlossen und geöffnet; der Entladeschalter 5 bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Ladeschalters 3 stellen sich die in der **Fig. 2** gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, dem Kondensator 9 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der **Fig. 2** durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{LE}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 Energie gespeichert wird. Der Energiefluß in die Spule 2 wird dabei durch die positive Potentialdifferenz zwischen dem Kondensator 9 und dem piezoelektrischen Element 1 bewirkt.

Beim kurz (beispielsweise einige  $\mu$ s) nach dem Schließen des Ladeschalters 3 erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der **Fig. 3** gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element 1, der Diode 6 und der Spule 2 bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der **Fig. 3** durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{LA}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule 2 gespeicherte Energie vollständig in das piezoelektrische Element 1 fließt. Entsprechend der Energiezufuhr zum piezoelektrischen Element erhöhen sich die an diesem einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule 2 zum piezoelektrischen Element 1 ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach **Fig. 1** erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder auch erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Ladevorgangs) wird der Ladeschalter 3 erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Ladeschalters 3 nimmt die im piezoelektrischen Element 1 gespeicherte Energie zu (die im piezoelektrischen Element bereits gespeicherte Energie und die neu zugeführte Energie summieren sich), und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen zu.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Ladeschalters **3** eine Vielzahl von Malen, so steigen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise an (siehe hierzu die Kurve A der später noch genauer erläuterten **Fig. 6**).

Wurde der Ladeschalter **3** während einer vorbestimmten Zeit und/oder eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element **1** den gewünschten Ladezustand erreicht, so wird das Laden des piezoelektrischen Elements durch Offenlassen des Ladeschalters **3** beendet.

Soll das piezoelektrische Element **1** wieder entladen werden, so wird dies durch ein wiederholtes Schließen und Öffnen des Entladeschalters **5** bewerkstelligt; der Ladeschalter **3** bleibt hierbei geöffnet.

Beim Schließen des Entladeschalters **5** stellen sich die in der **Fig. 4** gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element **1** und der Spule **2** bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{EE}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie (ein Teil derselben) in die Spule **2** transportiert wird. Entsprechend dem Energietransfer vom piezoelektrischen Element **1** zur Spule **2** nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ab.

Beim kurz (beispielsweise einige  $\mu s$ ) nach dem Schließen des Entladeschalters **5** erfolgenden Öffnen desselben stellen sich die in der **Fig. 5** gezeigten Verhältnisse ein. D.h., es wird ein aus einer Reihenschaltung aus dem piezoelektrischen Element **1**, dem Kondensator **9**, der Diode **4** und der Spule **2** bestehender geschlossener Stromkreis gebildet, in welchem ein wie in der Figur durch Pfeile angedeuteter Strom  $i_{EA}(t)$  fließt. Dieser Stromfluß bewirkt, daß in der Spule **2** gespeicherte Energie vollständig in den Kondensator **9** zurückgespeist wird. Nach erfolgtem Energietransport von der Spule **2** zum Kondensator **9** ist wieder der vorstehend bereits erwähnte stationäre Zustand der Schaltung nach **Fig. 1** erreicht.

Dann oder auch schon vorher oder erst später (je nach dem gewünschten zeitlichen Verlauf des Entladevorgangs) wird der Entladeschalter **5** erneut geschlossen und wieder geöffnet, wobei sich die vorstehend beschriebenen Vorgänge wiederholen. Durch das erneute Schließen und Öffnen des Entladeschalters **5** nimmt die im piezoelektrischen Element **1** gespeicherte Energie weiter ab, und dementsprechend nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und dessen äußere Abmessungen ebenfalls ab.

Wiederholt man das beschriebene Schließen und Öffnen des Entladeschalters **5** eine Vielzahl von Malen, so nehmen die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise ab (siehe hierzu die Kurve A in der **Fig. 6**).

Wurde der Entladeschalter **5** während einer vorbestimmten Zeit und/oder eine vorbestimmte Anzahl von Malen geschlossen und geöffnet und/oder hat das piezoelektrische Element den gewünschten Entladezustand erreicht, so wird das Entladen des piezoelektrischen Elements durch Offenlassen des Entladeschalters **5** beendet.

Das Ausmaß und der Verlauf des Ladens und des Entladens sind durch die Häufigkeit und die Dauer des Öffnens und Schließens des Ladeschalters **3** und des Entladeschalters **5** bestimmbar. Dies gilt nicht nur für die in der **Fig. 1** gezeigte Anordnung, sondern für alle Anordnungen, durch welche ein vergleichbares Laden und/oder Entladen von piezoelektrischen Elementen durchführbar ist; die besagten

Anordnungen müssen dabei im wesentlichen "nur" für ein getaktetes Laden und Entladen eines oder auch mehrerer piezoelektrischer Elemente geeignet sein.

An dieser Stelle sei angemerkt, daß Anordnungen nach

5 Art der **Fig. 7** nicht für ein getaktetes Laden und/oder Entladen von piezoelektrischen Elementen ausgelegt sind. Dort wirken die Lade- und Entladespulen nämlich als das induktive Element eines im Zusammenwirken mit dem piezoelektrischen Element gebildeten LC-Reihenschwingkreises, wobei die Induktivität des induktiven Elements und die Kapazität des piezoelektrischen Elements allein den Verlauf und den Umfang des Ladens und des Entladens bestimmen (geladen und entladen werden kann jeweils nur mit der ersten Stromhalbwelle der ersten Schwingkreisschwingung, denn ein Weiterschwingen des Schwingkreises wird durch die im Ladestromkreis und Entladestromkreis enthaltenen Dioden unterbunden).

Im Gegensatz hierzu wird bei zum getakteten Laden und Entladen ausgelegten Anordnungen (beispielsweise bei Anordnungen nach Art der **Fig. 1**) die Spule (oder ein anderes induktive Eigenschaften aufweisendes Element) als ein Energie-Zwischenspeicher verwendet, der abwechselnd von der Stromversorgungsquelle (beim Laden) bzw. vom piezoelektrischen Element (beim Entladen) zugeführte elektrische Energie (in Form von magnetischer Energie) speichert und – nach einer entsprechenden Schalterbetätigung – die gespeicherte Energie in Form von elektrischer Energie an das piezoelektrische Element (beim Laden) bzw. einen anderen Energiespeicher oder einen elektrischen Verbraucher (beim Entladen) abgibt, wobei die Zeitpunkte und die Dauer (und damit auch der Umfang) der Energiespeicherung und der Energieabgabe durch die Schalterbetätigung(en) bestimmt werden.

Dadurch kann das piezoelektrische Element in beliebig vielen, beliebig großen und in beliebigen zeitlichen Abständen aufeinanderfolgenden Stufen wunschgemäß weit geladen und entladen werden.

Nutzt man die gegebenen Möglichkeiten dahingehend aus, daß man die Schalter derart wiederholt öffnet und schließt, daß das piezoelektrische Element durch einen vorgegebenen mittleren Lade- bzw. Entladestrom auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird, so können das Laden und das Entladen von piezoelektrischen Elementen schonend für diese und einfach an die individuellen und wechselnden Verhältnisse anpaßbar durchgeführt werden.

Die Betätigung des Ladeschalters **3** und des Entladeschalters **5** erfolgt durch eine in der **Fig. 1** nicht gezeigte Steuer- oder Regeleinrichtung. Diese Steuer- oder Regeleinrichtung führt ein derartiges Öffnen und Schließen des Ladeschalters **3** und des Entladeschalters **5** durch, daß das zu ladende bzw. zu entladende piezoelektrische Element dadurch unter Einhaltung eines vorgegebenen mittleren (Lade- bzw. Entladestromflusses auf eine vorgegebene Spannung gebracht wird.

55 Hierzu werden der Ladeschalter **3** bzw. der Entladeschalter **5** zu bestimmten Zeitpunkten geöffnet und geschlossen, wobei sich die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geschlossen sind, und die Zeiten, während welcher die jeweiligen Schalter geöffnet sind, gleich oder unterschiedlich lang sein können und selbst innerhalb eines jeweiligen Lade- bzw. Entladevorganges beliebig – verändert werden können.

Der Lade- bzw. Entladestrom, der sich dabei einstellen soll, wird im betrachteten Beispiel unter Berücksichtigung der Temperatur des zu ladenden bzw. zu entladenden piezoelektrischen Elements festgelegt, wobei jedoch der Ladestrom und der Entladestrom während eines jeweiligen Lade- bzw. Entladevorganges im wesentlichen konstant gehalten

werden; gegebenenfalls erforderliche Veränderungen des Lade- und/oder Entladestromes können bei Bedarf aber auch während eines Lade- bzw. Entladevorganges durchgeführt werden.

Wie vorstehend bereits erwähnt wurde, wird die Temperatur des piezoelektrischen Elements im betrachteten Beispiel über dessen Kapazität und deren Temperaturabhängigkeit bestimmt.

Die Temperaturabhängigkeit des piezoelektrischen Elements kann durch eine Versuchsmessung bestimmt werden; die Meßergebnisse können in einer Tabelle abgelegt werden oder zur Aufstellung einer Umrechnungsvorschrift verwendet werden.

Die Ermittlung der Temperaturabhängigkeit braucht nur ein einziges Mal durchgeführt zu werden; sofern die Temperaturabhängigkeit veränderlich ist (sich beispielsweise abhängig vom Alter oder der Gebrauchsduer oder der Gebrauchshäufigkeit des piezoelektrischen Elements ändert), kann auch vorgesehen werden, die Temperaturabhängigkeit in bestimmten zeitlichen Abständen oder im Ansprechen auf bestimmte Ereignisse zu wiederholen.

Bei Kenntnis der Temperaturabhängigkeit der Kapazität des piezoelektrischen Elements kann aus der momentanen Kapazität des piezoelektrischen Elements dessen Temperatur bestimmt werden.

Die Kapazität des piezoelektrischen Elements wird im betrachteten Beispiel nicht direkt gemessen, sondern unter Verwendung der bei einem Ladevorgang oder einem Entladevorgang ermittelten bzw. verwendeten Werte des (Ent-)Ladestroms, der (Ent-)Ladezeit und der sich dadurch am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung berechnet. Dabei erweist es sich als vorteilhaft, wenn das (Ent-)Laden unter Verwendung eines bekannten (Ent-)Ladestromes erfolgt und andauert, bis sich am piezoelektrischen Element eine vorbestimmte Spannung einstellt; dann müssen nämlich "nur" die (Ent-)Ladezeit und die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung gemessen bzw. überwacht werden, was mit einfachen Mitteln und ohne Beeinflussung der Funktion des piezoelektrischen Elements möglich ist.

Die Formel, nach welcher sich die Kapazität des piezoelektrischen Elements aus den genannten Größen berechnen lässt, lautet

$$C_p = \frac{I \cdot \Delta t}{U_p}$$

wobei

$C_p$  die Kapazität des piezoelektrischen Elements

$I$  den (Ent-)Ladestrom

$\Delta t$  die (Ent-)Ladezeit, und

$U_p$  die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung

repräsentieren.

Die Kapazität des piezoelektrischen Elements kann auch über das Ausmaß bestimmt werden, um das sich das piezoelektrische Element beim Laden bzw. Entladen desselben ausdehnt bzw. zusammenzieht. Dabei kann man von dem Umstand Gebrauch machen, daß die durch das Laden bzw. Entladen des piezoelektrischen Elements verursachte Längenänderung desselben proportional zu der sich durch das Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elementes dort einstellenden Spannung ist, und daß die Spannung, die sich am piezoelektrischen Element einstellt, wenn dieses eine bestimmte Zeit mit einem bestimmten Strom geladen oder entladen wird, im wesentlichen ausschließlich von der Kapazität des piezoelektrischen Elementes abhängt.

Der Zusammenhang zwischen der Längenänderung des piezoelektrischen Elements, der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung, und der Kapazität des piezoelektrischen Elements läßt sich mathematisch durch

$$\Delta l = d_{33} \cdot U_p = d_{33} \cdot \frac{1}{C_p} \cdot I \cdot \Delta t$$

ausdrücken, wobei  
 $\Delta l$  die Längenänderung am piezoelektrischen Element  
 $d_{33}$  die piezoelektrische Ladungskonstante  
 $U_p$  die sich am piezoelektrischen Element einstellende Spannung

$C_p$  die Kapazität des piezoelektrischen Elements  
 $I$  der (Ent-)Ladestrom, und  
 $t_n$  die (Ent-)Ladezeit

repräsentieren.  
 Abhängig von der so oder anders ermittelten Temperatur des piezoelektrischen Elements können je nach den individuellen Erfordernissen der (Ent-)Ladestrom, die (Ent-)Ladezeit und/oder die Spannung, auf die das piezoelektrische Element zu bringen ist, variiert werden.

Die Einhaltung der festgelegten Werte wird durch Vorsehen einer die Anordnung gemäß Fig. 1 steuernde Steuereinrichtung oder regelnde Regeleinrichtung erreicht, wobei der Stromfluß jedoch sowohl bei der Steuerung als auch bei der Regelung durch ein entsprechend häufiges und langes Öffnen und Schließen des Ladeschalters bzw. des Entladeschalters eingestellt wird.

Im Ergebnis gelangt man sowohl bei der Steuerung als auch bei der Regelung zu einem Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements wie es in Fig. 6 beispielhaft veranschaulicht ist.

In der Fig. 6 repräsentiert

- die mit A bezeichnete Kurve den Verlauf der sich am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung,
- die mit B bezeichnete Kurve den Ladestrom bzw. den Entladestrom, durch den das piezoelektrische Element geladen bzw. entladen wird,
- die mit C bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Ladeschalters, und
- die mit D bezeichnete Kurve den Schaltzustand des Entladeschalters.

Aus dem wie gezeigt erfolgenden wiederholten Schließen und Öffnen des Ladeschalters (Kurve C) resultiert ein zwar schwankender, aber im Mittel gleichbleibend großer Ladestrom (Kurve B), durch den sich im betrachteten Beispiel am piezoelektrischen Element eine im Mittel gleichmäßig auf einen vorgegebenen Endwert ansteigende Spannung (Kurve A) einstellt; aus dem wie gezeigt erfolgenden wiederholten Schließen und Öffnen des Entladeschalters (Kurve D) resultiert ein zwar schwankender, aber im Mittel gleichbleibend großer Entladestrom (Kurve B), durch den sich im betrachteten Beispiel am piezoelektrischen Element eine im Mittel gleichmäßig auf einen vorgegebenen Endwert abfallende Spannung (Kurve A) einstellt.

Der mittlere Lade- bzw. Entladestrom, aber auch die Spannung, auf die das piezoelektrische Element zu laden bzw. zu entladen ist, sind im betrachteten Beispiel variabel und können nicht nur in Abhängigkeit von der Temperatur des piezoelektrischen Elements, sondern zusätzlich insbesondere in Abhängigkeit von der pro Einspritzvorgang einzuspritzenden Kraftstoffmenge, der Motordrehzahl, dem Druck im Rail oder der Motortemperatur festgelegt werden.

Die Temperatur des piezoelektrischen Elements und die

darauf basierenden Veränderungen (Anpassungen) der veränderbaren Parameter wird dabei vorzugsweise für jede Einspritzdüse separat vorgenommen. Dadurch kann erreicht werden, daß der Betrieb aller Einspritzdüsen unabhängig voneinander optimal an die jeweiligen Verhältnisse anpaßbar ist. 5

Das beschriebene Verfahren und die beschriebene Vorrichtung zum Ermitteln der Temperatur von piezoelektrischen Elementen ermöglichen es dabei unabhängig von den Einzelheiten deren praktischer Realisierung, die Temperatur von piezoelektrischen Elementen einfach und ohne Beeinflussung deren Funktion zu ermitteln. 10

## Patentansprüche

15

1. Verfahren zum Ermitteln der Temperatur eines piezoelektrischen Elements (1), gekennzeichnet durch die Schritte: Ermitteln der Kapazität des piezoelektrischen Elements bei der gesuchten Temperatur, und Bestimmen der gesuchten Temperatur des piezoelektrischen Elements basierend auf der ermittelten Kapazität und der Temperaturabhängigkeit der Kapazität. 20
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kapazität des piezoelektrischen Elements (1) basierend auf der Längenänderung des piezoelektrischen Elements berechnet wird, welche dieses beim Laden bzw. Entladen erfährt. 25
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kapazität des piezoelektrischen Elements (1) basierend auf den während eines Ladevorganges oder Entladevorganges ermittelten oder verwendeten Werten des Lade- oder Entladestromes, der Lade- oder Entladezeit und der sich dadurch am piezoelektrischen Element einstellenden Spannung berechnet wird. 30
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das piezoelektrische Element (1) als Aktor in einer Kraftstoff-Einspritzdüse einer Brennkraftmaschine verwendet wird. 35
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Temperaturermittlung an jeder Kraftstoff-Einspritzdüse durchgeführt wird. 40
6. Vorrichtung zum Ermitteln der Temperatur eines piezoelektrischen Elements, gekennzeichnet durch Mittel zum Ermitteln der Kapazität des piezoelektrischen Elements bei der gesuchten Temperatur und zum Bestimmen der gesuchten Temperatur des piezoelektrischen Elements basierend auf der ermittelten Kapazität und der Temperaturabhängigkeit der Kapazität. 45

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65

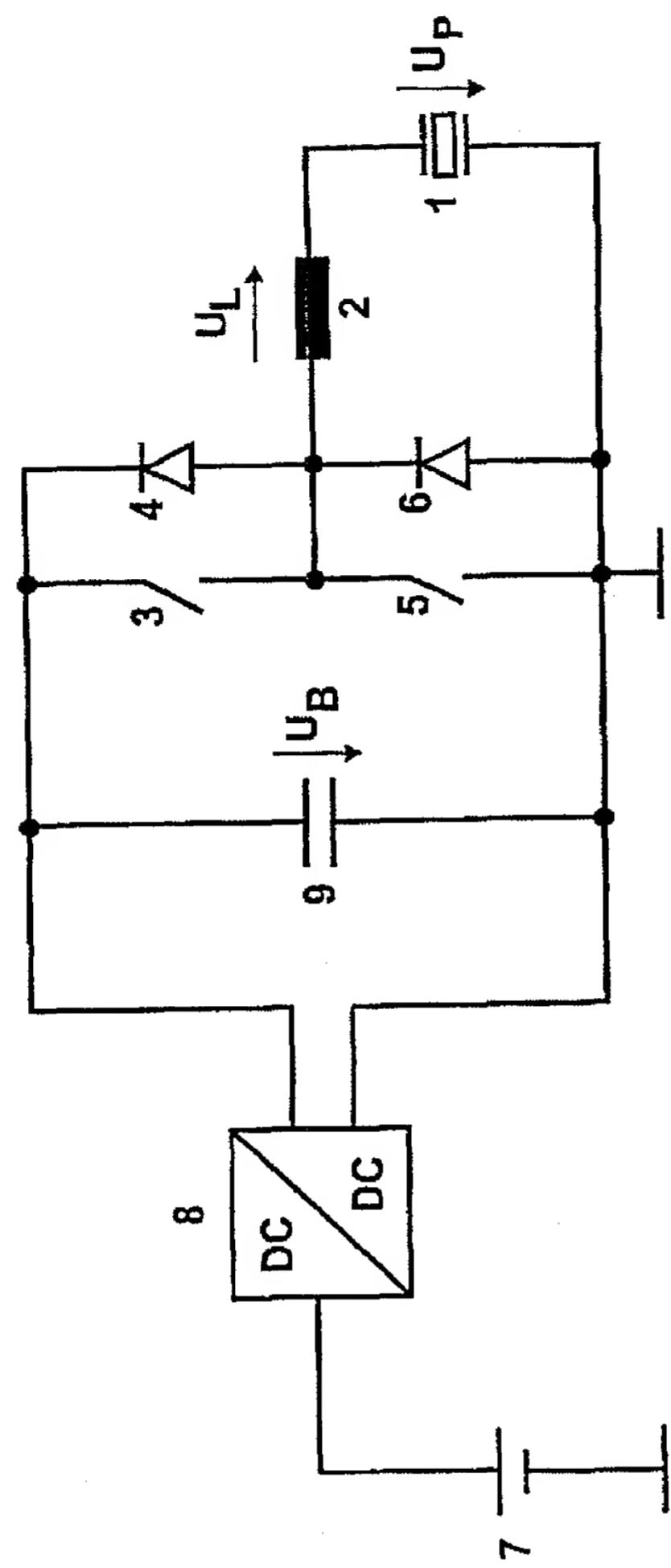


FIG. 1

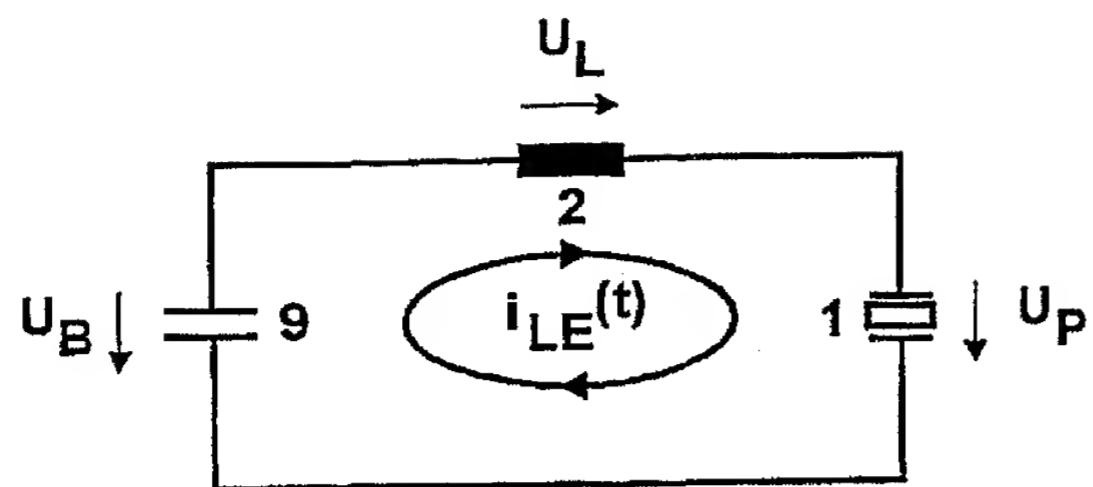


FIG. 2

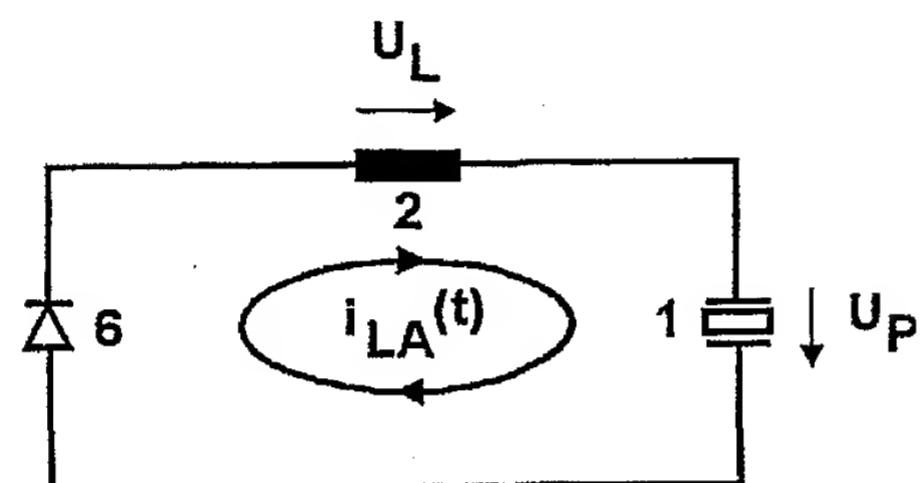


FIG. 3

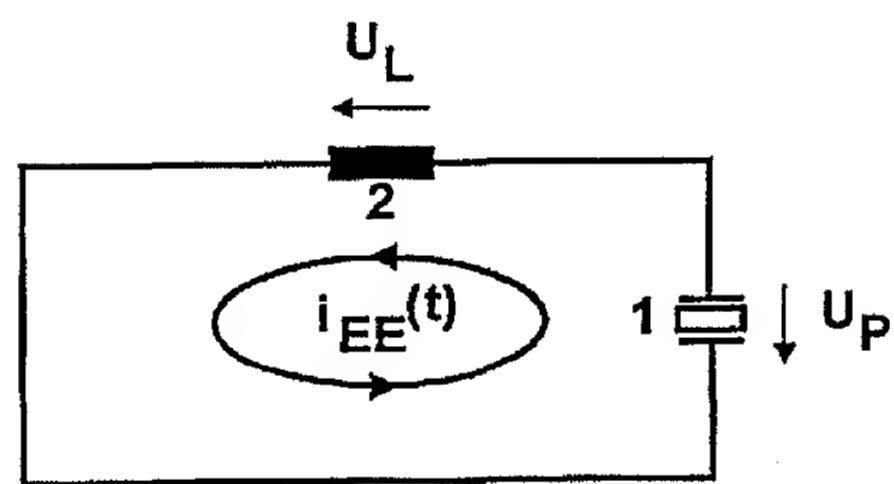


FIG. 4

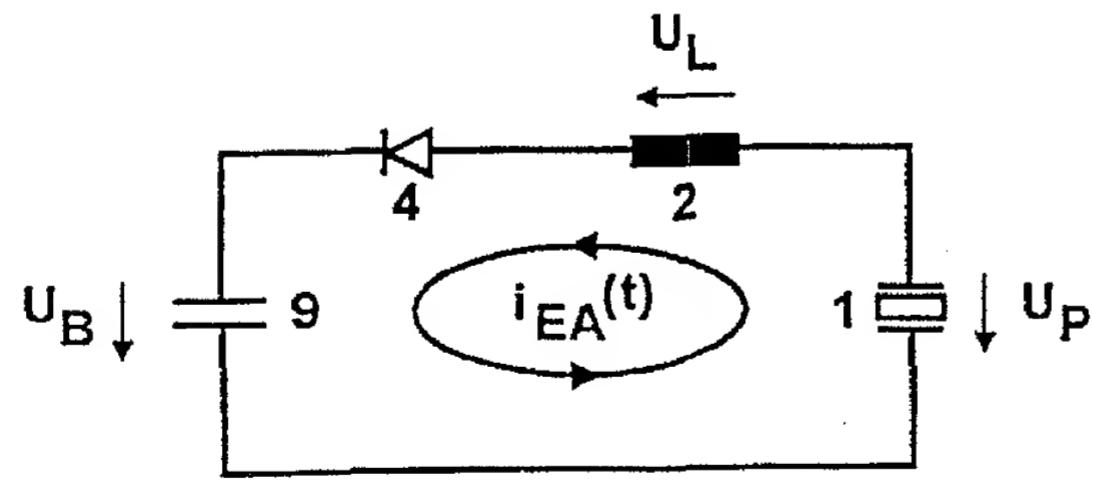


FIG. 5

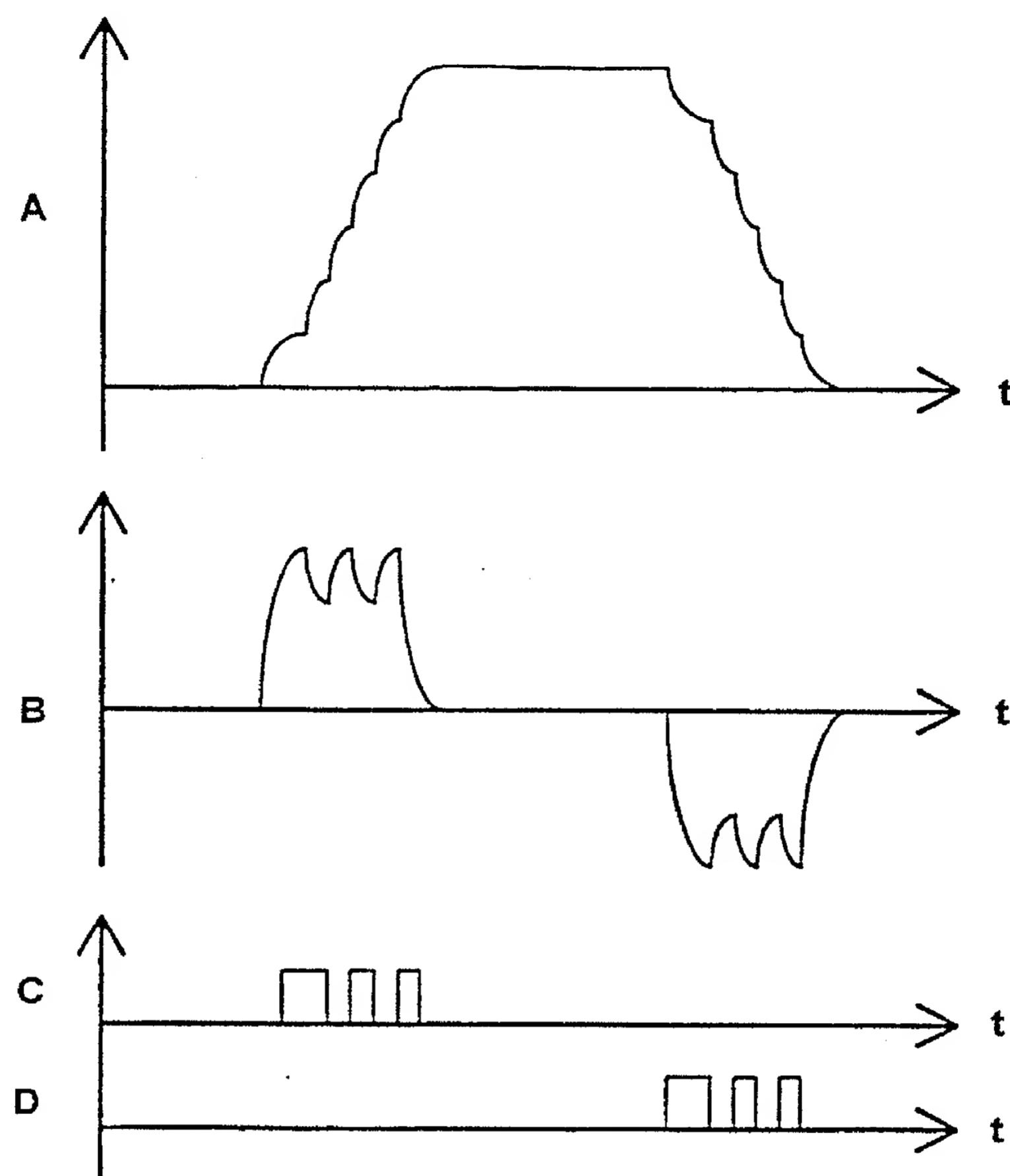
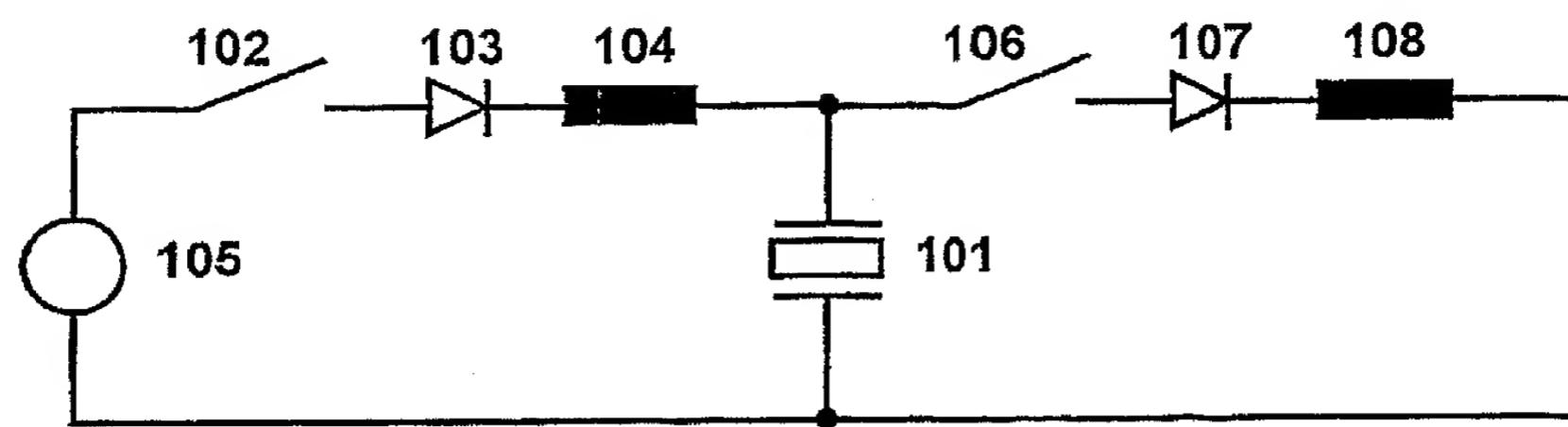


FIG. 6



**FIG. 7**